doi:10.13866/j.azr.2018.06.25

# 退耕还林工程以来黄土高原植被覆盖与地表湿润状况时空演变①

张 翀, 王 静, 雷田旺, 马 玲, 宋佃星
(宝鸡文理学院,陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室,陕西 宝鸡 721013)

**摘 要:** 基于2000—2014年的MODIS数据和Landsat数据,利用温度植被干旱指数反映地表湿润状况,分析了退耕还林工程以来黄土高原地表湿润状况与植被覆盖的时空变化特征及其相互关系。① 2001—2014年黄土高原归一化植被指数增速为6.3%·(10a)$^{-1}$,温度植被干旱指数降速为-4.5%·(10a)$^{-1}$,植被覆盖与地表湿润状况均呈增加趋势,分布呈"东南高、西北低"的特征,大体上可以看出两者具有正的空间相关性。② 从TVDI和NDVI的变化趋势来看,黄土高原植被覆盖与地表湿润状况整体上呈现出增加趋势。空间分布上反映出,植被覆盖变化基本上与地表湿润状况变化分布一致,但是仍然存在区域性差异。③ 从相关系数来看,黄土高原植被覆盖与地表湿润状况呈现出正相关。从变化趋势对应关系来看,14 a间黄土高原东北—西南一线山地地区植被覆盖与地表湿润状况变化有利于生态环境改善。人类活动强烈的平原地带极不利于生态环境改善。值得注意的是,退耕还林重点区是未来生态环境变化监测和管理的重点区域,以免引起再次退化。

**关键词:** 植被覆盖; 地表湿润状况; 时空演变; 退耕还林; 黄土高原

植被覆盖变化是区域生态系统环境变化的重要指示,是衡量地表植被状况的重要指标,对水文、生态、全球变化等都具有重要意义;同时,植被覆盖又是影响土壤侵蚀与水土流失的主要因子。因此,从保护和改善西部生态脆弱区生态环境出发实施退耕还林草政策,将水土流失严重的坡耕地和土地沙化严重的耕地停止耕种,造林种草,建设林草植被。自1999年退耕还林草政策实施以来,黄土高原迅速扩大人工林建设,1999—2010年累计造林面积$1.89\times10^7$ hm$^2$[1],植被覆盖率从1999年的31.6%增加到2013年的59.6%[2],增幅达88%,植被覆盖呈明显增加趋势[3-7];入黄河泥沙量锐减,2013年已达到了与唐代相当的水平(2 Gt·a$^{-1}$),并趋于平稳变化[2],黄土高原水土流失得到缓解,生态环境不断改善,鉴于此,国家"十三五"规划建议扩大退耕还林草政策的实施。但是,相比于天然植被,人工植被光合作用消耗的水分较大,加之前期退耕还林草植物生长所需水分的增加,引起干旱—半干旱地区地表湿润状况降低,土壤容易出现旱化特征,增加了植被衰败的可能性[8]。随着气温的不断升高,地表蒸散发加大、河湖萎缩与干涸,气候和环境的干旱化成为严峻的生存环境问题,进而使得地表湿润状况继续减小,土壤旱化程度加重,不仅反馈给人工植被发生水分胁迫,致使人工植被正常生理代谢失调,从而影响地表植被覆盖的变化,而且当土壤形成不可逆转的干层时,又会影响到降水或地表水入渗补给地下水,以及陆地水循环[9-10]。如果忽略了生态脆弱区本底自然环境特征及土壤水分时空分布特征,盲目扩大生态恢复和植被建设面积,可能引起人工植被退化,甚至导致群落衰败和生态系统退化,造成巨大生态经济损失,限制了生态恢复项目的可持续发展,与生态工程预期成效产生差距。因此,监测退耕还林工程以来地表湿润状况与植被覆盖变化特征,以及分析两者的相互关系,进一步探究生态工程的实施是否利于生态环境改善,具有重要的理论和现实意义。

地表湿润状况的传统监测方法有效性较高,是地表湿润状况监测、研究、应用的主要手段,但是该方法采样速度慢、耗费大量人力和物力、使用范围有限,加之测站分布不均,难以实现大范围、实时、精确

① **收稿日期:** 2017-12-15; **修订日期:** 2018-04-16
**基金项目:** 宝鸡文理学院校级重点项目(ZK16064),陕西省社会科学基金项目(2016G013)
**作者简介:** 张翀(1986-),男,讲师,主要从事资源环境遥感与GIS . E-mail: zhangch3348@126.com

的监测。随着遥感技术的迅速发展,遥感数据的多时相、多光谱、多分辨率、高光谱等特性,使得地表湿润状况快速、实时、动态监测成为可能[11-14]。在地表湿润状况遥感反演中,通过地表温度和植被覆盖特征空间反映地表湿润状况的遥感监测得到了广泛应用[15-19]。由于温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI)计算过程输入数据少、简单易行、生物物理学含义明确等特点,因此本研究利用植被覆盖与地表温度数据构建了TVDI,用以反映退耕还林以来黄土高原地表湿润状况,以期为后续退耕还林工程的合理实施提供一定的依据。

## 1　资料与方法

### 1.1　资料来源

本文所用数据包括黄土高原2001—2014年MODIS-NDVI(normalized difference vegetation index, NDVI)、MODIS-LST(land surface temperature, LST)以及2001年和2014年Landsat数据。MODIS-NDVI来自LP DAAC中的MODIS产品的MOD13A2数据集,空间分辨率为1 000 m,时间分辨率为16 d,利用单位转换系数0.000 1将其转为0~1,采用最大值合成法将NDVI数据转换为年际数据,以反映逐年植被覆盖状况;MODIS-LST来源于MOD11A2,空间分辨率为1 000 m,时间分辨率为8 d,利用单位转换系数0.02将其转为开尔文单位(Kelvin),由于LST存在大面积的无效数据,所以采用Cressman客观分析法与非对称高斯函数拟合[20],将8 d LST数据进行重构,为了与NDVI数据时间分辨率统一,采用平均值合成法将其合成为16 d数据。

### 1.2　地表湿润状况估算

Sandholt等指出,地表温度和植被覆盖(NDVI)的梯形空间可以反映土壤表层的水分含量状况,所以,本文采用TVDI来表征地表湿润状况[21],TVDI基于植被指数/地表温度的梯形特征空间计算而来,原理如下:

$$\mathrm{TVDI} = \frac{Ts - Ts_{\min}}{Ts_{\max} - Ts_{\min}} \qquad (1)$$

式中,$Ts$为每个像元的LST;$Ts_{\min}$为对应像元湿边的LST最小值;$Ts_{\max}$为对应像元湿边的LST最大值(图1)。

干边和湿边的拟合是计算TVDI的关键环节。首先,将NDVI的值域0~1划分为100个节点,节点之间相差0.01;然后,以每个节点为中心左右分别扩展0.005个单位形成一个区间,并在区间内查询LST的最大值和最小值;最后,分别以节点值序列为自变量,LST的最大值和最小值序列为因变量进行一元线性回归拟合,从而得到干边和湿边,再根据式(7)计算出每个像元的TVDI。本文中干湿边拟合均采用Theil-Sen趋势法,以此剔除数据中存在的异常值,使得拟合的干湿边方程更为稳健。TVDI值域在0~1之间,TVDI越大,地表越干燥,TVDI越小,地表越湿润。

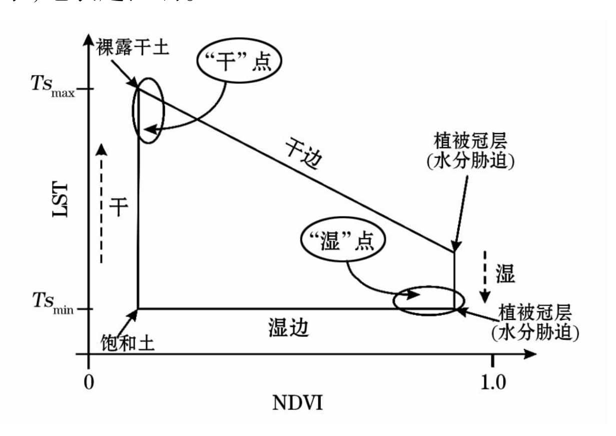



图1　NDVI与LST(地表湿度)构建TVDI示意图

Fig. 1　The TVDI configured by NDVI and LST

根据上述原理利用16 d LST和NDVI数据计算得到16 d TVDI数据。由于地表湿润状况年内最大值不能反映出该年份地表湿润的总体状况,故采用平均值合成法合成TVDI的年际数据。值得注意的是,TVDI的计算相当于是对LST进行最大限度标准化,标准化的上下限不是一个定值,而是随着NDVI的不同发生变化,所以,TVDI与NDVI并非同源数据,可以反映出地表湿润状况与植被覆盖之间的关系。

### 1.3　Theil-Sen趋势

Theil-Sen趋势既不受异常值影响,也不用服从一定的分布,结果更为科学、可信[22]。所以本文选用这种方法进行趋势分析,并采用非参数检验法Mann-Kendall (M-K)[23]对其趋势进行检验。计算公式如下:

$$\mathrm{slope} = \mathrm{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i}\right), \quad \forall j > i \qquad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \mathrm{sign}\,(x_j - x_i) \qquad (3)$$

$$\mathrm{sign}=(x_j-x_i)=\begin{cases}1, & x_j-x_i>0\\ 0, & x_j-x_i=0\\ -1, & x_j-x_i<0\end{cases} \quad (4)$$

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S>0\\ 0, & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S=0\end{cases} \quad (5)$$

$$P=2[1-\varphi(|Z|)] \quad (6)$$

$$\varphi(|Z|)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{|Z|}e^{-t^2}\mathrm{d}t \quad (7)$$

式中：slope 为 Theil-Sen 趋势；$x_j$，$x_i$ 为时间序列数据；$t_j$，$t_i$ 为时间序列对应的年份；$n$ 为时间序列的时间长度；$S$ 为 M-K 相关系数；$Z$ 为 M-K 显著性统计值；$P$ 为显著性统计值对应的概率值。

本文采用 $P$ 检验值对趋势进行检验，趋势的显著性被划分为以下级别：

**表 1　趋势及其显著性划分**

**Tab. 1　Classification of the trend and significance**

| 趋势 | P 检验值 | 级别 |
| --- | --- | --- |
| slope > 0 | $P<0.01$ | 极显著增加/改善 |
| | $0.01<P<0.05$ | 显著增加/改善 |
| | $0.05<P<0.1$ | 弱显著增加/改善 |
| | $P>0.1$ | 不显著增加/改善 |
| slope < 0 | $P<0.01$ | 极显著减小/退化 |
| | $0.01<P<0.05$ | 显著减小/退化 |
| | $0.05<P<0.1$ | 弱显著减小/退化 |
| | $P>0.1$ | 不显著减小/退化 |

## 2　结果与分析

### 2.1　植被覆盖与地表湿润状况时间变化特征

2001—2014 年整个黄土高原 NDVI 呈现出增加趋势，增速为 6.3%·(10a)$^{-1}$($P<0.001$)，TVDI 呈现出下降趋势，降速为 −4.5%·(10a)$^{-1}$($P<0.05$)；年平均 NDVI 均小于 0.6，年平均 TVDI 均大于 0.6，两者随时间变化趋近于 0.6，但未曾越过这个值(图 2)，且两者在时间变化上呈负相关，相关系数为 −0.68($P<0.01$)。表明，黄土高原植被覆盖在地表湿润状况增加的影响下呈增加趋势。年际 TVDI 与 NDVI 时间序列的 Hurst 指数分别为 0.501 2和 0.505 6，未来均呈微弱的持续性变化，即可能逐渐接近某个平衡点，因此，0.6 可能是 NDVI 和 TVDI 的共同平衡点，两者越接近这个值，黄土高原植被覆盖与地表湿润状况可能整体进入一种稳态，即两者相互依存且不会相互耗减。值得注意的是，2012 年以后，植被覆盖远离 0.6 这个平衡点，植被覆盖出现减小趋势，从而导致植被保持水土的能力减弱，地表湿润状况可能会出现减小态势。

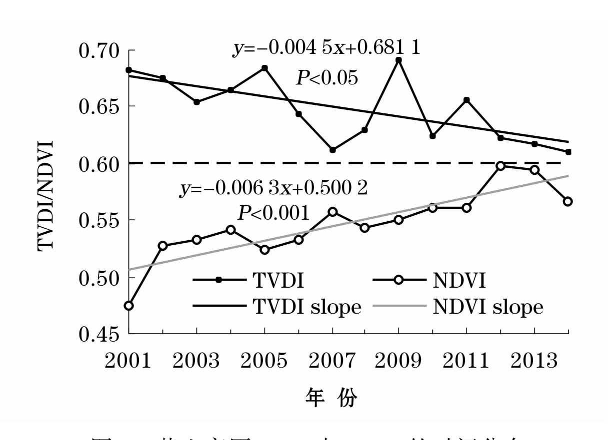


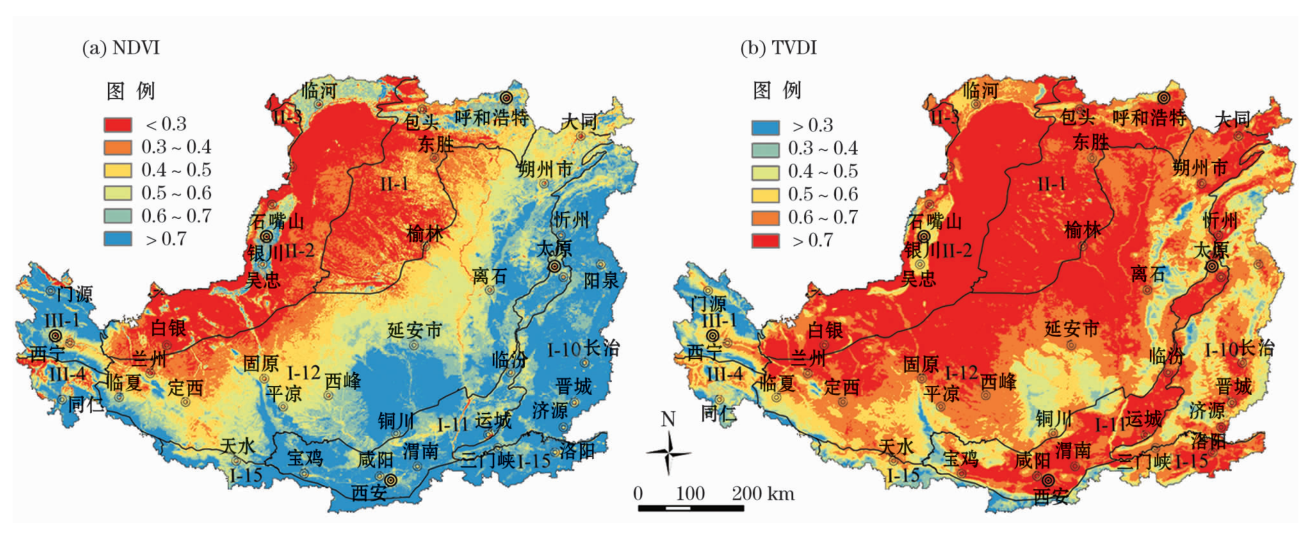

图 2　黄土高原 NDVI 与 TVDI 的时间分布

Fig. 2　Temporal distribution of NDVI and TVDI in the Loess Plateau

### 2.2　植被覆盖与地表湿润状况空间分布特征

黄土高原植被覆盖呈现出由东南向西北逐渐减小的分布特征，高值区集中于秦巴山地区和燕山—太行山山区，NDVI 均值分别为 0.77 和 0.73，该区域主要分布着落叶与常绿阔叶林，植被茂密，其次是汾渭盆地和农业—草原过渡区，NDVI 分别为 0.72 和 0.56，其中汾渭盆地属于地形平坦的农业区，分布着大面积农作物；农业—草原过渡区中吕梁山以落叶阔叶林为主，子午岭—黄龙山属于人为多次破坏后的天然次生林，处于森林草原—半干旱草原过渡地带，六盘山系典型草原—落叶阔叶林过渡区；另外，江河源区、河套平原、宁夏平原植被覆盖较高，其中江河源区分布着灌木、草本植被、高山草甸，河套平原和宁夏平原均为一年一熟粮食作物和耐寒经济作物。低值区集中于黄土高原西北部的非农业区，主要为草原、沙地和荒漠，植被稀疏，NDVI 小于 0.45(图 3 和图 4)。

黄土高原地表湿润状况也呈现出“东南高、西北低”的分布特征，大体上可以看出植被覆盖与地表湿润状况具有正相关性，即地表湿润状况大，植被




注:生态区代码Ⅰ-10:燕山-太行山山地落叶阔叶林生态区;Ⅰ-11:汾渭盆地农业生态区;Ⅰ-12:黄土高原农业与草原生态区;Ⅰ-15:秦巴山地落叶与常绿阔叶林生态区;Ⅱ-1:内蒙古高原中东部典型草原生态区;Ⅱ-2:内蒙古高原中部-陇中荒漠草原生态区;Ⅱ-3:内蒙古高原中部草原化荒漠生态区;Ⅲ-1:祁连山森林与高寒草原生态区;Ⅲ-4:江河源区-甘南高寒草甸草原生态区。下同。

图3　黄土高原NDVI与TVDI的空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of NDVI and TVDI in the Loess Plateau

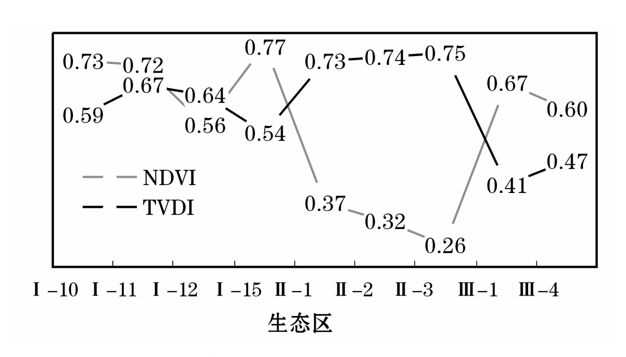



图4　黄土高原不同生态区的NDVI与TVDI

Fig. 4　The difference of NDVI and TVDI of different ecoregions in the Loess Plateau

覆盖高,反之则低。但是,两者仍然存在不一致的地区,主要为汾渭盆地和豫西南洛河两侧,均为地势较为平坦的农业区,主要分布着一年两熟或两年三熟连作粮食作物,该区域易受人类活动影响且作物常年消耗地表湿润状况,致使地表湿润状况较低。

### 2.3　地表湿润状况与植被覆盖变化趋势

采用Sen趋势计算了黄土高原TVDI和NDVI的变化趋势。根据TVDI变化趋势,地表湿润状况增加和减小趋势的面积分别占80.6%和19.4%,地表湿润状况整体上呈现出增加趋势。地表湿润状况增加区中,研究区面积的51.72%为无显著增加,其次是显著增加、极显著增加和弱显著增加,面积分别占13.4%、8.8%和6.7%;空间上,地表湿润状况极显著、显著与弱显著增加区集中分布于山西北部的吕梁山、恒山、五台山等山地、陕北窟野河与前套平原之间区域、陕西段黄河两岸、陕北清涧河与延河之间以及甘肃段渭河南北两侧,且呈现出以极显著区为中心,显著性逐渐向周围减弱(图5a)。地表湿润状况减小区中,研究区面积的17.4%无显著减小,极显著、显著与弱显著减小区面积均小于1.0%,合计2.0%;空间上,地表湿润状况减小区主要分布于研究区东南部陕西渭河—洛河两侧、河南洛河两侧、山西浊漳河及其源区与丹河两侧,以及西北部鄂尔多斯高原西部—黄河以东的荒漠草原区、宁夏平原、苦水河与长城之间和湟水谷地(图5a),反映出地表湿润状况减小区主要集中于河流两侧且毗连城镇建设用地,地表湿润状况的减小与河流水量的减少,导致土壤水分补给不足、人类活动(人口增长、土地利用变化等)密切相关。

根据NDVI变化趋势,黄土高原植被覆盖改善和退化趋势的面积分别占85.9%和14.1%,植被覆盖整体上呈改善趋势。植被覆盖增加区中,极显著改善和无显著改善面积相当,分别占总面积的31.7%和32.2%,其次是显著改善和弱显著改善,面积分别占16.3%和5.6%;空间上,植被覆盖显著改善区集中于吕梁山以西—子午岭和黄龙山以北—白于山以东—毛乌素沙地及其以南的区域,主要为退耕还林草重点建设区[23],其次分布于陇中高原及其以东地区(图5b)。植被覆盖退化区中,无显著退化面积占11.2%,显著退化区面积占3.0%;空间上,植被覆盖退化区主要分布于农业区。表明植被

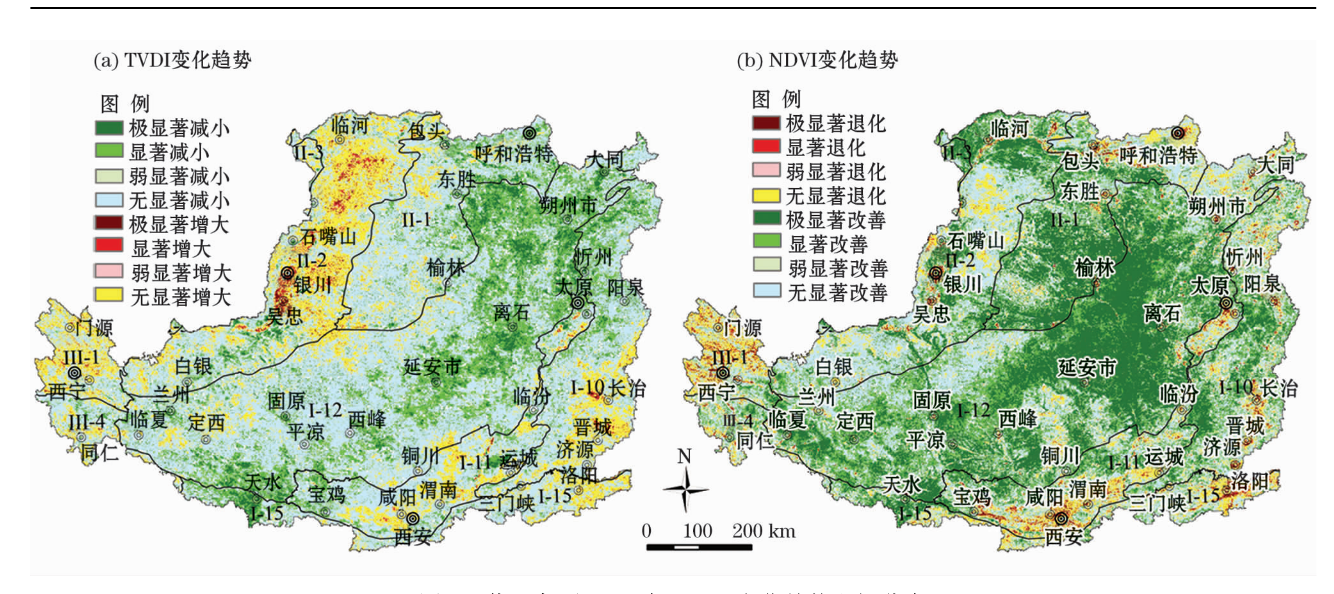



图 5 黄土高原 TVDI 与 NDVI 变化趋势空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of TVDI and NDVI trends in the Loess Plateau

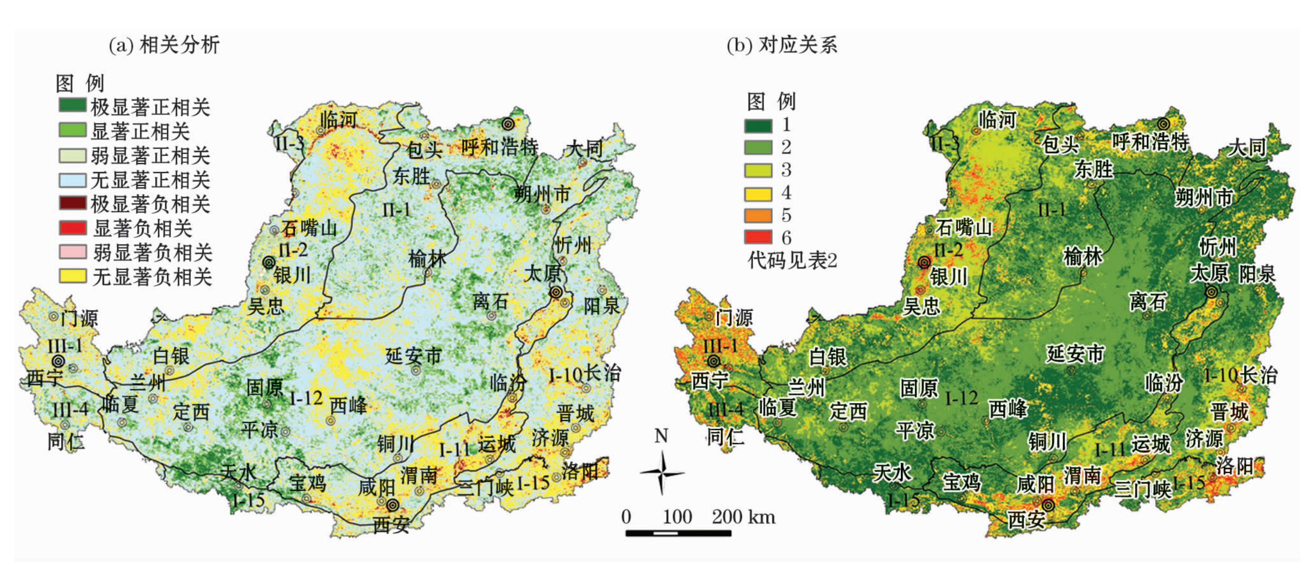



图 6 黄土高原地表湿润状况与植被覆盖相关分析

Fig. 6 The correlation between surface humidity and vegetation cover in the Loess Plateau



覆盖变化基本上由地表湿润状况变化驱动，但是仍然存在不一致地区(图 5b)。

## 2.4 植被覆盖与地表湿润状况的时空关系

2001—2014 年黄土高原 TVDI 与 NDVI 平均相关系数为 −0.19，且负相关面积占研究区的 73.9%，说明黄土高原植被覆盖与地表湿润状况呈现出正相关，通过两个要素变化趋势的空间叠加，筛选出地表湿润状况变化 ST 与植被覆盖变化 VT 的对应关系(表 2，图 6b)，从而反映出退耕还林工程以来两者的变化是否有利于生态环境改善。

(1) 植被覆盖改善—地表湿润状况增加且其趋势呈 VT < ST 的区域(代码 1)面积占 28.9%，主要分布于太行山—吕梁山—子午岭—黄龙山等山区，

**表 2 植被覆盖与地表湿润状况变化趋势类型划分**

**Tab. 2 Classification of the change trend of vegetation cover and surface humidity**

| 植被覆盖趋势 VT | 地表湿润状况趋势 ST | VT 与 ST 关系 | 是否有利于生态环境改善 | 类型代码(图 6b) | 面积比例 /% |
|---|---|---|---|---|---|
| 改善↗ | 增加↗ | VT < ST | 有利于 | 1 | 28.9 |
| | | VT > ST | 较有利于 | 2 | 42.1 |
| 改善↗ | 减小↘ | —— | 不利于 | 3 | 14.9 |
| 退化↘ | 增加↗ | —— | 较有利于 | 4 | 9.6 |
| 退化↘ | 减小↘ | \|VT\| < \|ST\| | 极不利于 | 5 | 2.4 |
| | | \|VT\| > \|ST\| | 极不利于 | 6 | 2.1 |

反映出 14 a 间植被覆盖与地表湿润状况具有相互促进作用,植被覆盖的增加提高了植物水源涵养能力,有利于生态环境改善;而植被覆盖改善—地表湿润状况增加且其趋势呈 VT > ST 的区域(代码 2)达 42.1%,分布于退耕还林重点区[24],反映出该区域植物生长速率大于水源涵养速率,短期内生态环境处于改善状态,长此以往可能会导致地表水分耗减至植物生理需水水平以下,引起生态再次退化。

(2) 植被覆盖改善—地表湿润状况减小的区域(代码 3)面积占 14.9%,分布于西北部鄂尔多斯高原西部—黄河以东的荒漠草原区,该区域地表湿润状况基数小,蒸发量大,加之植被趋于改善,加重地表水分耗减,生态环境不易在人类活动影响下改善,建议采用适当灌溉和栽植抗旱植被相结合的方式提高生态环境质量。

(3) 植被覆盖退化区(代码 4,5,6)面积占 14.1%,主要分布于河套平原、关中平原、汾河谷地、湟水谷地等农耕区,农耕区在人类活动影响下,土地性质易发生变化,引起植被覆盖降低,如粮食作物转换为经济作物(果园),植被覆盖的退化也会增加土壤侵蚀;而地表湿润状况却在不合理灌溉措施下呈现出不稳定变化趋势。该区域属于重要的粮食生产基地,建议恢复原有作物类型或约束作物性质发生变化,并定量核算作物灌溉需水量,以维持作物水分供需平衡。

## 3　讨论

本文采用 TVDI 来表示地表湿润状况大小,通过计算地表湿润状况和植被覆盖年内变化来分析 TVDI,反映地表湿润状况的可靠性。将黄土高原植被覆盖和地表湿润状况年内数据进行 Whittaker 平滑和傅里叶插值增采样(356 d),一定程度上剔除了数据噪声,提高了信噪比(图 7)。

地表湿润状况年内季节变化特征与张蕾等的西北地区土壤水分变化特征[25]高度吻合,差异性主要表现在变化特征点所对应的时间点不同。本文地表湿润状况最高值出现在一年内的 1 月上旬,4 月下旬地表湿润状况降至最低值,而张蕾等分析土壤水分 12 月中旬至 1 月较高,5 月下旬至 6 月上旬降至最小[25],本文地表湿润状况最低值对应时间较张蕾提前了 1 个月以上。原因主要是数据的时间分辨率

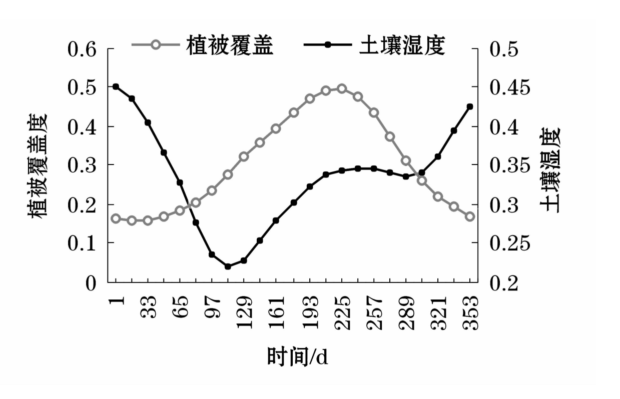



图 7　黄土高原植被覆盖与地表湿润状况的年内季节变化特征

Fig. 7　The seasonal variation of vegetation cover and surface humidity in the Loess Plateau

不同引起的,本文采用 16 d 数据进行分析,而张蕾采用旬值数据,分析中体现了植物生长耗水引起地表湿润状况变化,虽然其时间分辨率较高,但缺乏植被覆盖数据作为支撑,特征时间节点与实际植物生长情况不符。从植被覆盖年内季节变化特征来看,植物生长季始期为 4 月下旬,与地表湿润状况最低值时间点契合度很好(图 7)。韦振锋等分析得出陕甘宁黄土高原大多数植物生长季始期为 3—4 月[26],李强等认为生长季始期为 3 月下旬至 5 月下旬[27];谢宝妮等认为生长季始期为 4 月上旬至 5 月下旬[28],证明 TVDI 用来表示地表湿润状况变化特征具有很高的可信性。

虽然 TVDI 具有一定的可信性,但是本文仍然存在不足之处:利用 TVDI 反映地表湿润状况大小未经实测数据的时空验证,也未将其转换为土壤水分体积分数,后期数据应用较为困难。而土壤水分时空变化机理复杂,以及传统反演模型具有时空限制、不稳定等缺陷。在此基础上查阅大量文献,发现高光谱遥感数据为土壤水分反演提供了大量的样本数据,且反射波谱曲线的细微差别可以反映出土壤水分的微小变化,使得单一或多波段遥感数据探测不到的时空分布规律,在高光谱遥感中得以实现[29]。另外,采用机器学习方法可构建任意的非线性关系,尤其是引起广泛关注的深度学习方法,在遥感影像分类、预测与反演等方面表现出强大的应用潜力[30-35]。因此,今后的研究将侧重于土壤水分的高光谱遥感反演,基于高光谱遥感数据和实测土壤水分数据,利用深度学习方法建立遥感数据与实测土壤水分之间的最优模型,从而提高区域土壤水分

反演精度。

## 4 结 论

(1) 时间上,2001—2014 年黄土高原 NDVI 增速为 6.3% ·(10a)$^{-1}$,TVDI 降速为 −4.5% ·(10a)$^{-1}$,表明黄土高原植被覆盖与地表湿润状况均呈增加趋势。空间上,植被覆盖与地表湿润状况均呈"东南高、西北低"的分布特征,大体上可以看出两者具有正的空间相关性。

(2) 从 TVDI 和 NDVI 的变化趋势来看,黄土高原植被覆盖与地表湿润状况整体上均呈现出增加趋势;空间分布上反映出,植被覆盖变化基本上与地表湿润状况变化分布一致,但仍然存在差异性区域。

(3) 从相关系数来看,黄土高原植被覆盖与地表湿润状况呈现出正相关;从变化趋势对应关系来看,14 a 间黄土高原东北—西南一线山地植被覆盖与地表湿润状况变化有利于生态环境改善;人类活动强烈的平原地带极不利于生态环境改善;值得注意的是,退耕还林重点区是未来生态环境变化监测和管理的重点区域,以免引起再次退化。



**参考文献(References):**

〔1〕 易浪,任志远,张翀,等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系〔J〕. 资源科学,2014,36(1):166 − 174.〔Yi Lang, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau〔J〕. Resources Science, 2014,36(1):166 −174.〕

〔2〕 Chen Y, Wang K, Lin Y, et al. Balancing green and grain trade〔J〕. Nature Geoscience,2015,10(8):739 −741.

〔3〕 刘宇,傅伯杰. 黄土高原植被覆盖度变化的地形分异及土地利用/覆被变化的影响〔J〕. 干旱区地理,2013,36(6):1 097 − 1 102.〔Liu Yu, Fu Bojie. Topographical variation of vegetation cover evolution and the impact of land use/cover change in the Loess Plateau〔J〕. Arid Land Geography, 2013, 36(6): 1 097 − 1 102.〕

〔4〕 李双双,延军平,万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征〔J〕. 地理学报,2012,67(7):960 −970.〔Li Shuangshuang, Yan Junping, Wan Jia. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region〔J〕. Acta Geographica Sinica,2012,67(7):960 −970.〕

〔5〕 刘宪锋,杨勇,任志远,等. 2000—2009 年黄土高原地区植被覆盖度时空变化〔J〕. 中国沙漠,2013,33(4):1 244 − 1 249.〔Liu Xianfeng, Yang Yong, Ren Zhiyuan, et al. Changes of vegetation coverage in the Loess Plateau in 2000 −2009〔J〕. Journal of Desert Research,2013,33(4):1 244 −1 249.〕

〔6〕 王朗,傅伯杰,吕一河,等. 生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化〔J〕. 应用生态学报,2010,21(8):2 109 −2 116.〔Wang Lang, Fu Bojie, Lv Yihe, et al. Spatio-temporal variations of vegetation cover in northern Shaanxi Province under the background of ecological restoration〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(8):2 109 −2 116.〕

〔7〕 张宝庆,吴普特,赵西宁. 近 30 a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析〔J〕. 农业工程学报,2011,27(4):287 − 293.〔Zhang Baoqing, Wu Pute, Zhao Xining. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982 −2009〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(4):287 −293.〕

〔8〕 郭忠升. 土壤水分植被承载力的理论与实践〔M〕. 北京:科学出版社,2014.〔Guo Zhongsheng. Theory and Practice of Soil Water and Vegetation Carrying Capacity〔M〕. Beijing:Science Press, 2014.〕

〔9〕 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究〔J〕. 自然资源学报,2001,16(5):427 −432.〔Li Yushan. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau〔J〕. Journal of Natural Resources,2001,16(5):427 −432.〕

〔10〕 田均良. 黄土高原生态建设环境效应研究〔M〕. 北京:气象出版社,2010.〔Tian Junliang. Study on Environmental Effect of Ecological Construction in Loess Plateau〔M〕. Beijing:China Meteorological Press,2010.〕

〔11〕 Kogan F, Adamenko T, Guo W. Global and regional drought dynamics in the climate warming era〔J〕. Remote Sensing Letters, 2013,4(4):364 −372.

〔12〕 Karnieli A, Agam N, Pinker R T. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations〔J〕. Journal of Climate,2010,23(3):618 −633.

〔13〕 陈书林,刘元波. 卫星遥感反演土壤水分研究综述〔J〕. 地球科学进展,2012,27(11):1 192 −1 203.〔Chen Shulin, Liu Yuanbo. Satellite retrieval of soil moisture:An overview〔J〕. Advances in Earth Science,2012,27(11):1 192 −1 203.〕

〔14〕 王鹏新,龚健雅,李小文,等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型〔J〕. 地球科学进展,2003,18(4):527 − 533.〔Wang Pengxin, Gong Jianya, Li Xiaowen, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products〔J〕. Advances in Earth Science,2003,18(4):527 −533.〕

〔15〕 刘立文,张吴平,段永红. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用〔J〕. 生态学报,2014,34(13):3 704 −3 711.〔Liu Liwen, Zhang Wuping, Duan Yonghong. Terrain corrected TVDI for agricultural drought monitoring using MODIS data〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2014,34(13):3 704 −3 711.〕

〔16〕 Patel N R, Anapashsha R, Kumar S, et al. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status〔J〕. International Journal of Remote Sensing,2009,30(1):23 −39.

〔17〕宋春桥,游松财,刘高焕. 基于 TVDI 的藏北地区土壤湿度空间格局〔J〕. 地理科学进展,2011,30(5):570－576.〔Song Chunqiao,You Songcai,Liu Gaohuan. The spatial pattern of soil moisture in Northern Tibet based on TVDI method〔J〕. Progress in Geography,2011,30(5):570－576.〕

〔18〕邸兰杰,王卫,成贺玺. 基于 ATI 和 TVDI 模型的河北平原土壤湿度遥感反演〔J〕. 中国生态农业学报,2014,22(6):737－743.〔Di Lanjie,Wang Wei,Cheng Hexi. Remote sensing inversion of soil moisture in Hebei Plain based on ATI and TVDI models〔J〕. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2014,22(6):737－743.〕

〔19〕李天祺,朱秀芳,潘耀忠,等. MODIS 陆地表面温度数据重构方法研究〔J〕. 北京师范大学学报(自然科学版),2015,51(增刊1):70－76.〔Li Tianqi,Zhu Xiufang,Pan Yaozhong,et al. Study on reconstruction methods of MODIS LST products〔J〕. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2015,51(Suppl. 1):70－76.〕

〔20〕徐建华. 现代地理学中的数学方法〔M〕. 北京:高等教育出版社,2002.〔Xu Jianhua. Mathematical Methods in Contemporary Geography〔M〕. Beijing:Higher Education Press,2002.〕

〔21〕Kendall M G. Rank Correlation Methods〔M〕. 3rd ed. New York:Hafner Publishing Company,1962:37－38.

〔22〕Sandholt I,Rasmussen K,Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status〔J〕. Remote Sensing of Environment,2002,79(2－3):213－224.

〔23〕John R,Chen Jiquan,Lu Nan,et al. Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia〔J〕. Remote Sensing of Environment,2008,112(5):2 018－2 032.

〔24〕刘纪远,匡文慧,张增祥. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局〔J〕. 地理学报,2014,69(1):3－14.〔Liu Jiyuan,Kuang Wenhui,Zhang Zengxiang. Spatiotemporal characteristics,patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s〔J〕. Acta Geographica Sinica,2014,69(1):3－14.〕

〔25〕张蕾,吕厚荃,王良宇. 中国土壤湿度的时空变化特征〔J〕. 地理学报,2016,71(9):1 494－1 508.〔Zhang Lei,Lv Houquan,Wang Liangyu. Spatial-temporal characteristics of soil moisture in China〔J〕. Acta Geographica Sinica,2016,71(9):1 494－1 508.〕

〔26〕韦振锋,王德光,张翀. 近 12 年陕甘宁黄土高原区植被物候时空变化特征〔J〕. 生态与农村环境学报,2014,30(4):423－429.〔Wei Zhenfeng,Wang Deguang,Zhang Chong. Spatio-temporal variation of vegetation phenology on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region in recent 12 years〔J〕. Journal of Ecology and Rural Environment,2014,30(4):423－429.〕

〔27〕李强,张翀,任志远. 近 15 年黄土高原植被物候时空变化特征分析〔J〕. 中国农业科学,2016,49(22):4 352－4 365.〔Li Qiang,Zhang Chong,Ren Zhiyuan. Analysis of temporal and spatial variation of vegetation phenology in the Loess Plateau〔J〕. Scientia Agricultura Sinica,2016,49(22):4 352－4 365.〕

〔28〕谢宝妮,秦占飞,王洋. 基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应〔J〕. 农业工程学报,2015,31(15):153－160.〔Xie Baoni,Qin Zhanfei,Wang Yang. Monitoring vegetation phenology and their response to climate change on Chinese Loess Plateau based on remote sensing〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(15):153－160.〕

〔29〕杨涛,宫辉力,李小娟. 土壤水分遥感监测研究进展〔J〕. 生态学报,2010,30(22):6 264－6 277.〔Yang Tao,Gong Huili,Li Xiaojuan. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2010,30(22):6 264－6 277.〕

〔30〕Zhao W,Du S. Spectral-spatial feature extraction for hyperspectral image classification:A dimension reduction and deep learning approach〔J〕. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2016,54(8):4 544－4 554.

〔31〕刘大伟,韩玲,韩晓勇. 基于深度学习的高分辨率遥感影像分类研究〔J〕. 光学学报,2016,36(4):298－306.〔Liu Dawei,Han Ling,Han Xiaoyong. High spatial resolution remote sensing image classification based on deep learning〔J〕. Acta Optica Sinica,2016,36(4):298－306.〕

〔32〕Jean N,Burke M,Xie M,et al. Combining satellite imagery and machine learning to predict poverty〔J〕. Science,2016,353(6 301):790－794.

〔33〕郭继凯,吴秀芹,董贵华,等. 基于 MODIS/NDVI 的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析〔J〕. 干旱区研究,2017,34(3):621－629.〔Guo Jikai,Wu Xiuqin,Dong Guihua,et al. Vegetation coverage change and relative effects of driving factors based on MODIS/NDVI in the Tarim River Basin〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(3):621－629.〕

〔34〕高炜,安如,王喆. 基于微波遥感技术的干旱监测指数及其应用研究——以三江源区为例〔J〕. 干旱区研究,2017,34(3):541－550.〔Gao Wei,An Ru,Wang Zhe. Drought index and its application based on microwave remote sensing technology:A case study in the Three-River headwaters region〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(3):541－550.〕

〔35〕滑永春,李增元,高志海. 2001 年以来甘肃民勤植被覆盖变化分析〔J〕. 干旱区研究,2017,34(2):337－343.〔Hua Yongchun,Li Zengyuan,Gao Zhihai. Variation of vegetation coverage in Minqin county since 2001〔J〕. Arid Zone Research ,2017,34(2):337－343.〕

# Spatiotemporal Evolution of Vegetation Cover and Surface Humidity Since Implementing the Grain for Green Project in the Loess Plateau

ZHANG Chong, WANG Jing, LEI Tian-wang, MA Ling, SONG Dian-xing

(*Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Modeling*, *Baoji University of Arts and Sciences*, *Baoji* 721013, *Shaanxi*, *China*)

**Abstract:** Based on the MODIS data and Landsat data during the period from 2000 to 2014, the temperature vegetation drought index was used to reflect the surface humidity, and the temporal and spatial changes of surface humidity and vegetation cover on the Loess Plateau since implementing the Grain for Green Project were analyzed. The findings suggested as follows: ① The growth rate of normalized vegetation index in the Loess Plateau during the period from 2001 to 2014 was 6.3% · $(10a)^{-1}$, the temperature vegetation drought index was decreased by −4.5% · $(10a)^{-1}$, the vegetation cover and surface humidity were increased, the vegetation coverage was high in the southeast but low in the northwest, and it could be generally seen that there was a positive correlation between the surface humidity and the vegetation coverage; ② According to the change trend of TVDI and NDVI, the vegetation cover and surface humidity were in an increase trend in the Loess Plateau. The spatial change of vegetation cover was in accordance with the variation of surface humidity perfectly, but there was a regional difference; ③ The correlative coefficient indicated that there was a positive correlation between the vegetation cover and the surface humidity in the Loess Plateau. From the perspective of the change trend, the changes of vegetation cover and surface humidity in the northeast-southwest zone of the Loess Plateau in 14 years were beneficial to the improvement of ecological environment. Intensive human activities in the plain are very unfavorable to the improvement of ecological environment. It is worth to pay attention to the key areas where the Grain for Green Project is implemented because they are critical for monitoring and managing the ecological environment change in the future so as to avoid degenerating again.

**Key words:** vegetation cover; surface humidity; spatiotemporal evolution; Grain for Green Project; Loess Plateau